

AKUSTISCHE UNTERSUCHUNGEN AN TASTENINSTRUMENTEN  
DES 18. BIS 20. JAHRHUNDERTS <sup>+</sup>

Das sehr weit gefaßte Thema erfordert in diesem Rahmen die Beschränkung auf einen Vergleich von sieben Hammerflügeln. Es soll mit quantitativen Mitteln untersucht werden, inwieweit diese Instrumente in bezug auf ihre Klangeigenschaften einander ähnlich sind. Zur Analyse diene die aus der technischen Akustik bekannte Methode der Pegelhäufigkeitsstatistik, mit deren Hilfe die Verteilung aperiodischer und nichtstationärer Schallvorgänge sich erfassen läßt. Eine weitere Auswertung der Daten ermöglicht die Faktorenanalyse, ein in der Psychologie entwickeltes und vor allem dort erprobtes Verfahren, auf das an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden kann.

Für die Untersuchungen wurden Instrumente vom letzten Viertel des 18. Jahrhunderts bis zum ersten Viertel des 20. Jahrhunderts ausgewählt:

1. Ein Hammerflügel von Johann Andreas Stein, Augsburg 1788, Wiener Mechanik, Umfang  $F_1-f^3$ , zweichörig (Nürnberg, Germanisches Nationalmuseum, MIR)
2. Ein Hammerflügel von Anton Walter, Wien um 1790, Wiener Mechanik, Umfang  $F_1-f^3$ , zweichörig, ab  $b^1$  dreichörig (ehem. Besitz der Herzogin Dorothea von Kurland Nürnberg, Germanisches Nationalmuseum, MIR)
3. Ein Hammerflügel von John Broadwood & Sons, London 1815, englische Mechanik mit Einzelauslösung, Umfang  $C_1-c^4$ , dreichörig (Nürnberg, Germanisches Nationalmuseum, MIR)
4. Ein Hammerflügel von Johann Baptist Streicher, Wien 1834, überschlägige Mechanik, Umfang  $C_1-f^4$ , zweichörig, ab  $E_1$  dreichörig (München, Deutsches Museum, Slg. Nr. 32 962)
5. Ein Hammerflügel, signiert "Erard à Paris", Paris Ende der dreißiger Jahre des 19. Jh., Mechanik mit doppelter Auslösung, Umfang  $C_1-f^4$ , zweichörig, ab  $E_1$  dreichörig (Das Instrument wurde von Chopin gespielt, Nürnberg, Germanisches Nationalmuseum, MIR)
6. Ein Hammerflügel von Ignace Pleyel & Comp., Paris um 1845, Mechanik mit doppelter Auslösung, Umfang  $C_1-a^4$ , zweichörig, ab  $F$  dreichörig (Nürnberg, Germanisches Nationalmuseum, MIR)
7. Ein Konzertflügel mit Aliquotsaiten von Julius Blüthner, Leipzig um 1920 (Instr.-Nr. 104 941), Umfang  $A_2-c^5$ , bis  $F_1$  einchörig, bis  $d$  zweichörig, bis  $es^2$  dreichörig, ab  $e^2$  dreichörig mit Aliquotsaiten (München, Deutsches Museum, Slg. Nr. 51 949).

Das Meßverfahren wurde bereits in einer Einzelanalyse an einem von Joseph Brodmann um 1810 in Wien gebauten Hammerflügel <sup>1</sup> erprobt. <sup>2</sup> Das sehr umfangreiche Datenmaterial dieses einen Instrumentes hat gezeigt, daß die Frequenzbereiche unterhalb von 100 Hz sowie oberhalb von 2000 Hz Unterschiede zwischen den Tonstufen nicht mehr sonderlich gut aufklären; ebenso wurde für den weiteren Vergleich der oben erwähnten Hammerflügel auf einen Frequenzabstand von 100 Cents zwischen den Meßbereichen verzichtet und statt dessen der Abstand auf den doppelten Wert, 200 Cents, vergrößert, was den Meßaufwand halbierte, jedoch noch genügend Information ergab. Insgesamt wurden in 27 Frequenzbereichen von 104-2093 Hz jeweils neun Töne eines Flügels durchgezählt, als Bezugspunkt der Ton "C" des Brodmann-Flügels gewählt, der in der vorigen Analyse auf dem Hauptfaktor höchste Ladung ( $F_1 = 0,909$ ) aufwies.

Es sei bemerkt, daß es sich bei diesen Untersuchungen um auf die Frequenzverteilung



bezogene Relativmessungen handelt, während die Stimmung der Flügel außer acht gelassen wurde; dies wäre auch wegen der unterschiedlichen Dimensionen der einzelnen Flügel gar nicht anders möglich.

Dem "C" des Brodmann-Flügels am ähnlichsten und damit Ausgangspunkt der Messungen waren:

"A<sub>1</sub>" der Instrumente von Stein und Walter,

"B<sub>1</sub>" der Instrumente von Broadwood, Streicher, Pleyel und Blüthner,

"H<sub>1</sub>" des Erard-Flügels.

Die übrigen Töne stehen dazu im Oktav- oder Quintverhältnis. Die Ergebnisse der Brodmann-Analyse waren bestimmend für eine derartige Auswahl, denn es hatte sich dort gezeigt, daß die Töne auf "c" und "g" je einen eigenen Faktor bildeten.

Um die Darstellung zu vereinfachen, wird in der Folge nur von den Lagen "a" bzw. "e" die Rede sein, was sich auf die Tonhöhe, nicht aber auf eine fixierte Taste bezieht.

Die Töne der Hammerflügel wurden am jeweiligen Standort zweikanalig auf Tonband aufgenommen, um möglichst viel an Information zu erhalten. 15 Sekunden lang wurde jeder Ton etwa einmal pro Sekunde angeschlagen; Kontaktfolie markierte Anfang und Ende jedes Bandabschnittes, um für die Analyse über die 27 Frequenzbereiche stets dasselbe Stück zu erhalten. Die hierzu erforderliche Meßapparatur bestand aus einem Pegelhäufigkeitszähler (Brüel & Kjaer, Typ 4420), mit Hilfe dessen in Verbindung mit einem Pegelschreiber (Brüel & Kjaer, Typ 2305) nicht stabile Schallpegel statistisch ausgewertet werden können. Vor die Apparatur war ein Frequenzanalysator (Brüel & Kjaer, Typ 2107) geschaltet.

Das technische Prinzip bedarf kurzer Erläuterung:

Auf dem Schreibarm des Pegelschreibers sitzt ein zwölfmal unterteilter Kontaktstreifen, dessen Kontakte entsprechend dem jeweiligen Stand des Schreibarms ausgelöst werden. Der Pegelhäufigkeitszähler zählt mit einer Impulsfrequenz von zehn pro Sekunde diejenigen Zeitabschnitte, in denen der Schreibstift im jeweils zugeordneten Pegelabschnitt verharret; hierbei verhindert eine elektronische Sperre Doppelzählungen. Wie erwähnt, wird nicht der Gesamtpegel bestimmt, sondern vor der Pegelhäufigkeitsanalyse mit Hilfe elektrischer Filter jeweils ein Frequenzbereich im Verhältnis 4:5 (Terzbereich) ausgesiebt.

Der Pegelhäufigkeitszähler ist entsprechend den zwölf Pegelbereichen mit zwölf sechsstelligen Einzelzählwerken sowie einem Summenzähler ausgestattet. Der Meßbereich beträgt 50 dB. Die dem jeweiligen Schalldruck analogen Spannungen werden in Dezibel registriert, so daß die gemessene Skala eine logarithmische Transformation der Schalldruckwerte darstellt. In dieser Form kommt die Pegelhäufigkeitsverteilung zumeist einer Normalverteilung nahe. Dieser Sachverhalt erlaubt für die weiteren Untersuchungen das Reduzieren der Meßdaten, und zwar in unserer Untersuchung zunächst auf die arithmetischen Mittelwerte.

Aus den Analysen ergibt sich für jeden Ton ein charakteristisches mittleres Schallpegelprofil. Diese Mittelwertsprofile enthalten genügend Information, um darauf weitere Operationen aufzubauen. So erbrachte eine aus der Interkorrelationsmatrix errechnete Faktorenanalyse sechs Faktoren mit Varianzanteilen zwischen 23,6 % (Faktor 1) und 12,5 % (Faktor 6).<sup>3</sup> Sie differenzieren hauptsächlich die Tonlage; das ist nicht selbstverständlich, rechnet man normalerweise doch vor allem mit hoher Lageidentität (z. B.  $c \sim c^1 \sim c^2$ ), wie dies auch die Brodmann-Analyse erbrachte.

Die Faktorenanalyse verschiedener Flügel zeigt für gleiche Töne weitgehend übereinstimmende Faktorenladungen, die sich nach den Tonhöhen mit der jeweils höchsten Ladung interpretieren lassen. Abbildung 1 zeigt dies für Faktor 1, die übrigen fünf sehen entsprechend aus. Gleichzeitig kann man Unterschiede zwischen den verschiedenen Klang-



eigenschaften der Hammerflügel erkennen; das sei an drei Instrumenten verschiedener Zeiträume demonstriert, dem Hammerflügel von Walter (1790), dem von Pleyel (1845) und dem Blüthner-Flügel (1920). In tiefen Tonlagen unterscheiden sich Walter und Pleyel deutlich voneinander, was an den abweichenden Faktorenladungen abzulesen ist:

Walter - Faktor = 0,247 (niedrig)  
           Faktor<sub>3</sub><sup>2</sup> = 0,655 (hoch)

Pleyel - Faktor = 0,467 (hoch)  
           Faktor<sub>3</sub><sup>2</sup> = -0,123 (niedrig und negativ)

Die Ladungen sind auf "A<sub>1</sub>" bezogen.<sup>4</sup> Aufklärung geben die Schallpegelprofile dieses Tones (Abb. 2): Bei Walter ist der Hauptanteil der Schallenergie auf den Bereich zwischen 130 und 450 Hz begrenzt; Pleyel weist demgegenüber eine starke Tiefenresonanz von ungefähr 130 Hz an abwärts auf, von etwa 180 Hz aufwärts besitzt er dagegen eine flache Schallenergieverteilung. Die Korrelation zwischen beiden Schallpegelprofilen beträgt trotz nahezu gleicher Grundfrequenz nur  $Q = +0,252$ .

Die Faktorenladungen auf Faktor 2 (0,325) und Faktor 3 (0,431) bei Blüthner sind sehr ähnlich, Faktor 2 korrespondiert eher mit Pleyel, Faktor 3 dagegen tendiert zu Walter. Das Schallpegelprofil bestätigt diese Angaben: wie zu erwarten, starke Tiefenresonanz ab etwa 130 Hz ähnlich Pleyel, danach bis etwa 580 Hz Hauptanteile der Schallenergie mit ausgeprägten Maxima um 160, 300 und 440 Hz. Abgesehen von diesen Spitzen und der tiefen Lage gleicht die Schallpegelverteilung mehr der des Walter-Flügels, was wiederum die verhältnismäßig hohe Korrelation von  $Q = +0,568$  zwischen Walter und Blüthner im Vergleich zu Walter-Pleyel erklärt. Die Klangunterschiede in höheren Tonbereichen drücken sich in der Analyse entsprechend dem Klangeindruck aus: Nach dem zeitgenössischen Klangideal spricht der Walter-Flügel durchsichtig, "silbrig" an. Wir finden bei F. J. Hirt<sup>5</sup> eine Bestätigung, wenn er meint, daß "den Hammerklavierbauern des 18. und frühen 19. Jahrhunderts" "Wahrung des Silbertones der Kielinstrumente höchstes Ideal" bedeutete.

Dieser Sachverhalt ist zweifellos auf einen verstärkten Anteil höherer Teilschwingungen zurückzuführen. Pleyel - und erst recht Blüthner - haben mehr Volumen, entsprechend einer grundtönigen Spektralverteilung. Die Unterschiede der drei Faktorenladungen verdeutlichen ebenso diese Tatsache: Während auf Faktor 6 die Ladungen für "a<sup>2</sup>" nicht wesentlich differieren (Walter = 0,747; Pleyel = 0,875; Blüthner = 0,740), für Walter und Blüthner nahezu identisch sind, laden die Töne auf "a<sup>1</sup>" sehr unterschiedlich (Walter = 0,292; Pleyel = -0,464; Blüthner = -0,120), am stärksten kontrastieren wieder Walter und Pleyel.

Die gleichen Ergebnisse finden wir bei Faktor 5 für "e<sup>3</sup>" (Walter = 0,719; Pleyel = 0,874; Blüthner = 0,761) und für "e<sup>2</sup>" (Walter = 0,381; Pleyel = -0,374; Blüthner = -0,114) (Abb. 3). Am deutlichsten sieht man den Unterschied in den Faktorenladungen zwischen Walter und Pleyel im Diagramm von Abbildung 4. Gleichzeitig läßt sich erkennen, daß die Ähnlichkeit zwischen "e<sup>2</sup>" und "e<sup>3</sup>" bei Walter ( $Q = +0,480$ ) verhältnismäßig groß ist, bei Pleyel ( $Q = -0,131$ ) und Blüthner ( $Q = +0,088$ ) dagegen gering. Dies erklärt sich daraus, daß der größte Anteil der Schallenergie auf die Grundfrequenzen entfällt. Allgemein läßt sich feststellen, daß die Tonhöhen im Oktavabstand im tiefen Bereich (z. B. A<sub>1</sub>, A, a) ähnlicher sind als im höheren (Abb. 1 und 5), die einzige Ausnahme bildet hier - wie erwähnt - der Walter-Flügel. An diesen wenigen Beispielen sollte gezeigt werden, daß selbst so labile Schallvorgänge wie die des Klavierklanges mit Hilfe der Frequenz-Pegelhäufigkeits-Analyse in Verbindung mit faktorenanalytischer Behandlung sehr weitgehend untersucht werden können. Trotz begrenzter Analysierschärfe und der



Auswahl von nur wenigen Tonhöhen ließen sich sechs unabhängige gut interpretierbare Dimensionen des akustischen Geschehens verschiedener Klavierinstrumente extrahieren.

Diese Darstellung bildet einen kurzen Ausschnitt aus einer größeren Untersuchung, die der allgemeinen akustischen Klassifizierung von Hammerflügeln aus verschiedenen Epochen dienen soll.

#### Anmerkungen

- <sup>+</sup> Diese Untersuchung wurde im Rahmen der von der Fritz-Thyssen-Stiftung geförderten Forschungsarbeiten der Abteilung für Musikalische Akustik beim Staatlichen Institut für Musikforschung durchgeführt.
- 1 Wiener Mechanik, Umfang  $F_1$ - $f^4$ , dreichörig. Das Instrument wurde von C. M. von Weber im April 1813 gekauft und steht heute in der Instr.-Slg. des Staatl. Instituts f. Mf., Berlin, Slg. Nr. 312.
- 2 H. P. Reinecke und D. Droysen, Methoden zur Untersuchung nichtstationärer Schallvorgänge, dargestellt an der Analyse eines Hammerflügels, in: Elektronische Datenverarbeitung in der Mw., hrsg. v. H. Heckmann, Regensburg 1967.
- 3 Vgl. Tabelle 1.
- 4 Vgl. alle Angaben zu Faktorenladungen in Tabelle 1.
- 5 F. J. Hirt, Meisterwerke des Klavierbaus, Olten 1955, S. XXI.

Gewichtszahlen auf  $F_1$   
für verschiedene Tonhöhen

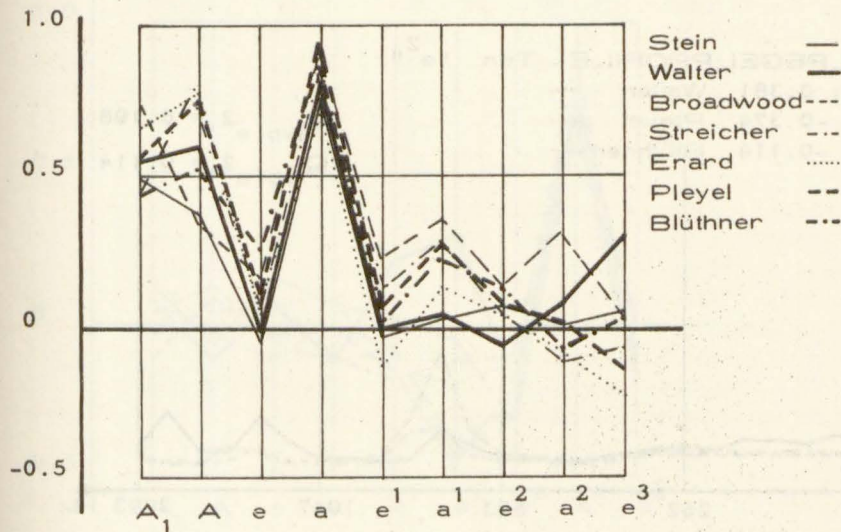


Abb. 1

# SCHALLPEGELPROFILE Ton "A<sub>1</sub>"

Faktor 3: 0.655 Walter (1790)

-0.123 Pleyel (1845)

0.431 Blüthner (1820)

$Q_{wp}(A_1) = 0.252$

$Q_{wb}(A_1) = 0.568$

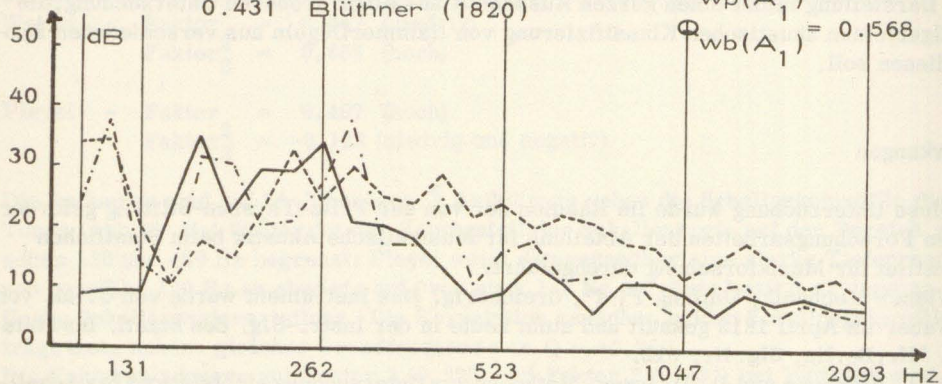


Abb. 2

# SCHALLPEGELPROFILE Ton "e<sup>2</sup>"

Faktor 5: 0.381 Walter —

-0.374 Pleyel ---

-0.114 Blüthner ---

$Q_{wp}(e^2) = 0.198$

$Q_{wb}(e^2) = 0.114$

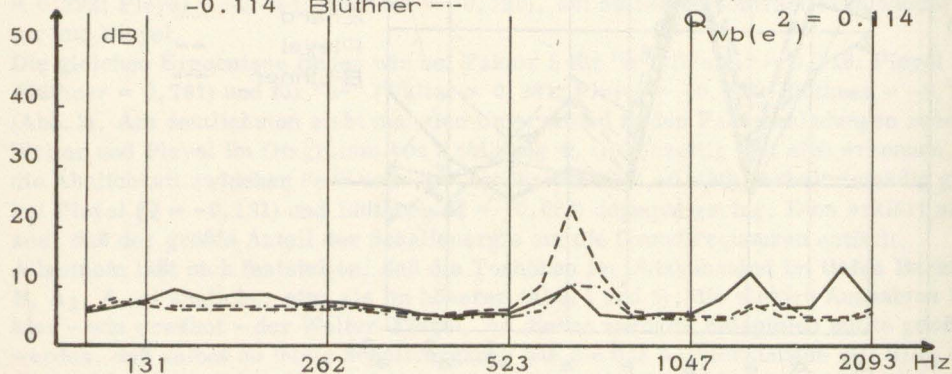


Abb. 3



Gewichtszahlen auf  $F_5$   
für verschiedene Tonhöhen

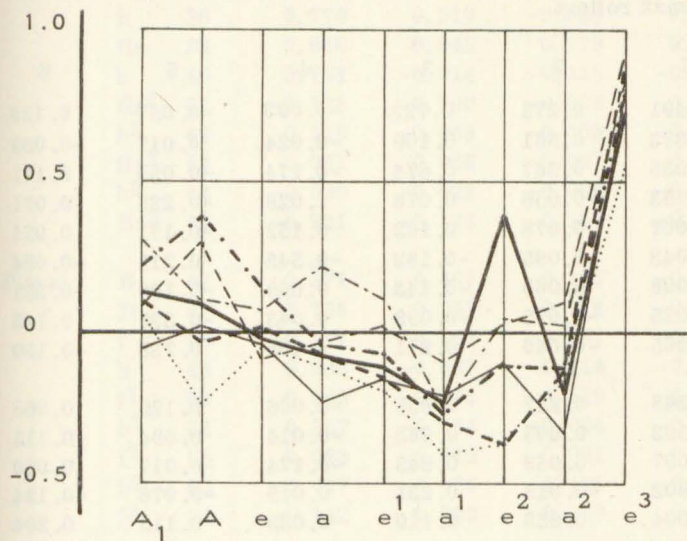


Abb. 4

Gewichtszahlen auf  $F_6$   
für verschiedene Tonhöhen

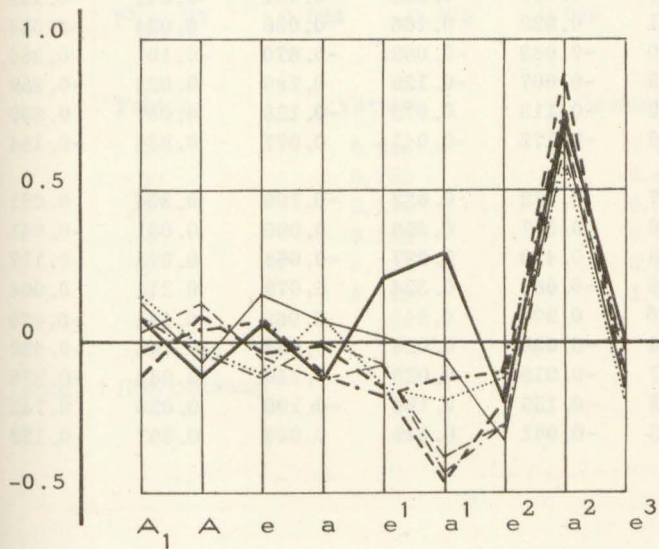


Abb. 5

Tabelle 1

Faktorenmatrix, nach Varimax rotiert

			1	2	3	4	5	6	
Stein	A <sub>1</sub>	01	0.491	0.275	0.723	-0.093	-0.057	0.123	
	A	02	0.383	0.551	0.100	-0.024	0.017	-0.059	
	e	03	-0.035	0.567	0.674	-0.174	-0.038	0.161	
	a	04	0.793	-0.056	0.076	0.028	-0.225	0.071	
	a <sup>1</sup>	05	-0.007	0.878	0.102	0.152	-0.171	0.021	
	a <sup>1</sup>	06	0.043	0.095	-0.183	-0.545	-0.211	-0.054	
	e <sup>2</sup>	07	0.098	0.060	-0.143	0.659	-0.109	-0.321	
	a	a <sup>2</sup>	08	0.025	-0.075	-0.098	0.043	-0.337	0.745
	e <sup>3</sup>	09	0.065	-0.040	0.211	0.105	0.738	-0.130	
Walter	A <sub>1</sub>	10	0.548	0.247	0.655	-0.006	0.129	0.068	
	A	11	0.592	0.605	0.343	-0.014	0.094	-0.115	
	e	12	-0.007	0.058	0.845	-0.174	-0.017	0.050	
	a	13	0.803	-0.015	0.231	0.019	-0.076	-0.124	
	e <sup>1</sup>	14	0.004	0.858	0.110	0.033	-0.115	0.204	
	a <sup>1</sup>	15	0.118	-0.072	0.039	-0.437	-0.256	0.292	
	e <sup>2</sup>	16	-0.063	-0.186	0.135	0.474	0.381	-0.200	
	a <sup>2</sup>	17	0.067	-0.111	0.088	0.030	-0.200	0.747	
	e <sup>3</sup>	18	0.287	-0.167	0.367	0.104	0.719	0.003	
Broad- wood	B <sub>1</sub>	19	0.726	0.065	0.425	-0.038	0.098	0.030	
	B	20	0.344	0.585	-0.015	0.002	0.299	0.124	
	f	21	0.157	-0.032	0.855	0.257	-0.089	-0.051	
	b	22	0.926	0.008	0.183	-0.091	-0.041	-0.103	
	f <sup>1</sup>	23	0.231	0.922	0.166	0.058	0.024	-0.084	
	b <sup>1</sup>	24	0.350	-0.083	-0.062	-0.670	-0.101	-0.386	
	f <sup>2</sup>	25	0.123	-0.007	-0.129	0.785	0.022	-0.259	
	b <sup>2</sup>	26	0.309	-0.113	0.075	-0.128	0.087	0.809	
	f <sup>3</sup>	27	0.026	-0.172	-0.041	0.077	0.886	-0.164	
Streicher	B <sub>1</sub>	28	0.437	0.172	0.632	-0.100	0.304	0.081	
	B	29	0.800	0.367	0.356	0.096	0.091	-0.041	
	f	30	0.083	0.430	0.827	-0.068	0.075	-0.117	
	b	31	0.846	-0.088	0.324	0.079	0.211	0.004	
	f <sup>1</sup>	32	0.126	0.903	0.245	0.065	0.111	-0.076	
	b <sup>1</sup>	33	0.284	-0.036	0.026	-0.652	-0.244	-0.432	
	f <sup>2</sup>	34	0.057	-0.013	0.023	0.749	0.044	-0.278	
	b <sup>2</sup>	35	-0.112	-0.155	0.194	-0.100	0.020	0.743	
	f <sup>3</sup>	36	-0.065	-0.081	0.049	0.088	0.857	-0.123	



			1	2	3	4	5	6
Erard	H <sub>1</sub>	37	0.658	0.217	0.543	0.216	0.148	0.149
	H	38	0.770	0.310	-0.038	0.150	-0.244	-0.031
	fis	39	0.066	0.043	0.778	0.067	-0.079	-0.111
	h	40	0.731	-0.014	-0.115	-0.216	-0.114	0.089
	fis <sup>1</sup>	41	-0.128	0.790	-0.002	0.208	-0.201	-0.161
	h <sup>1</sup>	42	0.119	-0.069	-0.109	-0.636	-0.415	-0.189
	fis <sup>2</sup>	43	0.061	0.066	-0.097	0.715	-0.380	-0.119
	h <sup>2</sup>	44	-0.080	-0.022	-0.099	-0.131	-0.196	0.754
	fis <sup>3</sup>	45	-0.221	-0.122	-0.154	0.057	0.545	-0.180
Pleyel	B <sub>1</sub>	46	0.571	0.467	-0.123	-0.108	0.100	-0.105
	B	47	0.756	0.369	0.018	-0.016	-0.030	0.079
	f	48	0.107	0.087	0.961	0.137	0.012	-0.025
	b	49	0.936	-0.057	0.114	-0.109	-0.097	-0.011
	f <sup>1</sup>	50	0.065	0.911	0.119	0.150	-0.150	-0.146
	b <sup>1</sup>	51	0.267	-0.064	-0.064	-0.661	-0.301	-0.464
	f <sup>2</sup>	52	0.083	0.072	-0.081	0.787	-0.374	-0.203
	b <sup>2</sup>	53	0.017	0.028	-0.106	-0.145	-0.137	0.875
	f <sup>3</sup>	54	-0.142	0.003	-0.193	0.035	0.847	-0.153
Blüthner	B <sub>1</sub>	55	0.414	0.325	0.431	-0.099	0.219	-0.032
	B	56	0.522	0.440	0.062	-0.017	0.374	0.038
	f	57	0.261	0.030	0.891	-0.052	0.148	0.042
	b	58	0.897	0.016	0.057	-0.074	-0.036	-0.012
	f <sup>1</sup>	59	0.021	0.859	0.101	-0.122	-0.068	-0.175
	b <sup>1</sup>	60	0.223	-0.068	-0.072	-0.626	-0.274	-0.120
	f <sup>2</sup>	61	0.133	0.155	-0.036	0.754	-0.114	-0.098
	b <sup>2</sup>	62	-0.067	0.068	-0.058	-0.104	-0.124	0.740
	f <sup>3</sup>	63	0.024	0.373	0.049	-0.066	0.761	-0.149

Faktor	Varianz	Gesamtvarianz
1	0.236	0.236
2	0.183	0.420
3	0.175	0.594
4	0.146	0.741
5	0.135	0.875
6	0.125	1.000

Tabelle 1 (Fortsetzung)